



縦波および横波を用いる非破壊検査のための3自由度を有する超音波プローブに関する研究

著者	青柳 将史
発行年	2017
学位授与大学	筑波大学 (University of Tsukuba)
学位授与年度	2016
報告番号	12102甲第8082号
URL	http://hdl.handle.net/2241/00148174

氏 名	青 柳 将 史			
学 位 の 種 類	博 士 (工 学)			
学 位 記 番 号	博 甲 第 8082 号			
学位授与年月日	平成 29 年 3 月 24 日			
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当			
審 査 研 究 科	システム情報工学研究科			
学位論文題目	縦波および横波を用いる非破壊検査のための 3 自由度を有する超音波プローブに関する研究			
主 査	筑波大学	准教授	博士 (工学)	若 槻 尚 斗
副 査	筑波大学	教授	工学博士	水 谷 孝 一
副 査	筑波大学	准教授	博士 (工学)	海老原 格
副 査	筑波大学	助教	博士 (工学)	善 甫 啓 一
副 査	筑波大学	助教	博士 (工学)	前 田 祐 佳
副 査	関西大学	准教授	博士 (工学)	山 本 健

論 文 の 要 旨

この論文は、弾性体中の非破壊検査を目的として物体表面の超音波を検出する接触型のプローブに関するものであり、接触面に対して接線方向と法線方向すなわち 3 軸方向に対して感度を有する超音波プローブを創成およびその有効性を検証することを目的としている。本研究では、圧電振動子の形状と電極配置等の工夫により 3 軸それぞれの方向に対して独立に信号を検出できる方式を考案するとともに、有限要素シミュレーションによりその妥当性を検証している。さらに、振動子アレイを用いて物体中の可視化を行う場合、従来のプローブでは縦波と横波の両方に感度を有しそれらを区別できないことから可視化像に虚像を生じる問題に着目し、提案プローブを用いることでそれを抑制する手法を提案している。論文は全 6 章で構成されており、概要は次に示す通りである。

第 1 章では、本研究の背景として、アレイ超音波探傷法における超音波プローブの重要性が示され、その問題点が挙げられている。特に、アレイ探傷時に縦波と横波が同時に発生することによるアーティファクトの問題を取り上げ、それを解決するために縦波と横波を区別する必要性が示されている。また、それを実現するため、3 自由度プローブの創成が目的として述べられている。

第 2 章では、3 自由度プローブの動作原理と目標とする特性が示されている。プローブの動作原理では、まず圧電材料の性質、および分極軸の向きと入力する電場の方向の関係によって発生させることができる振動モードについて説明し、3 軸方向分極された圧電素子の形状と電極配置を工夫することで、任意の振動方向について独立に信号を送受信できることが述べられている。次に、このプローブを複数用いてアレイ信号処理による可視化を行うとき、到来波が縦波か横波であるか判別する方法が提案されている。その原理は、縦波と横波では波動の進行方向に対して粒子変位がそれぞれ異なる

ことを利用するものである。すなわち、送受信の指向性は遅延和アレイの原理に基づいて決定し、3自由度プローブの特性によりその粒子変位の方向を測定することで、到来波が縦波か横波かの判別が行えることが述べられている。また、本研究では動作原理の検証を有限要素解析によって行われており、そのための解析モデルがここで説明されている。3次元モデルは計算量の莫大さが問題となるため、本研究では主に2次元有限要素解析を行うこと、およびその妥当性についても述べられている。

第3章では、動作原理に基づいて3自由度プローブを設計し、任意方向の振動の送受信について検証を行っている。また、アレイによる超音波探傷を想定して3自由度プローブの送受信特性を検証している。まず、振動子単体において解析が行われている。前章で説明された動作原理に基づき縦方向駆動および横方向駆動を行った場合の振動状態を有限要素解析し基本的な動作が確認されている。また、圧電素子にバックリング材を付加することで、送受信特性がより改善されることが示されている。次に、媒質とプローブが接触している状況を想定した解析が行われている。送信時において縦方向駆動および横方向駆動のとき、媒質との接触面上で法線方向変位および接線方向変位のみをそれぞれ発生させることができることが明らかにされている。受信時においては、プローブと媒質の接触境界に対して角度を変えて強制変位を入力した場合、3自由度プローブからの出力電圧から法線方向変位と接線方向変位の成分を独立に測定できることが明らかにされている。これらの結果より、3自由度プローブを用いることで、送受信のいずれにおいても法線方向変位と接線方向変位を独立に扱うことが可能であることが説明されている。

第4章では、3自由度プローブアレイとアレイ信号処理の適用例として、アレイにより縦波あるいは横波のビームを送信するときに、所望のビームとは別に副次的に発生するビームを抑制する手法が提案されている。非破壊検査を想定してビームフォーミングを行うとき、各プローブにおける振動方向を任意に制御できる特性を利用することにより、アレイから縦波あるいは横波が単独で送信され、副次的に発生するビームを抑制することが可能であることが数値計算例とともに示されている。検証の結果、例えば縦波のビームを送信するとき、プローブにおける振動方向が所望のビーム方向に対して平行になるようすることで、副次的に発生する横波のビームが抑制されることが示されている。反対に、横波のビームを送信する場合、プローブの振動方向をビーム方向に対して垂直にすることで、副次的に発生する縦波のビームを抑制することも示されている。これらの結果より、縦波あるいは横波を選択的に送信可能であることが明らかにされている。

第5章では、3自由度プローブおよびアレイ信号処理による受信特性に着目して非破壊検査への適用例が示されている。まず、信号受信を想定した有限要素解析による波動伝搬シミュレーションより、縦波と横波の判別可能性が検証されている。第3章より得られた提案プローブの受信特性を用いて受信された音波の粒子変位を法線方向成分と接線方向成分に分離し、リサージュ図形を描くことで粒子変位の軌跡が測定され、その軌跡から縦波と横波の判別が出来ることが示されている。また、プローブの厚み縦振動と厚みすべり振動では共振周波数が異なることから、それぞれの方向成分では受信時の位相特性が異なっており振動の軌跡に影響を与えるが、その特性を補正することで判別の結果が改善可能であることも併せて述べられている。以上の結果を用いると、アレイ信号処理を用いる非破壊検査において、提案する3自由度プローブを適用することで到来超音波における縦波と横波の判別が可能であり、これにより、ビームフォーミング時による可視化像中に発生し得るアーティファクトが判別可能となることから提案プローブが有用であることが示されている。

第6章では、得られた成果をまとめるとともに、本研究において創成されたデバイスである3自由度プローブとアレイ信号処理を併用することで、非破壊検査時に発生するアーティファクトの抑制および発生したアーティファクトの判別が可能であることを通じて、本提案プローブの有用性が述べられている。

審 査 の 要 旨

【批評】

本論文は、1方向にのみ感度を有する縦波専用あるいは横波専用の超音波プローブに替わるものとして3自由度プローブが提案されている。これは、モノリシックな圧電基板上に複数の溝と複数の電極を設ける独創的なアイデアにより3自由度を持たせたものであり、任意方向の粒子変位を持つ超音波を送受信可能であることを特徴としている。論文中では、このプローブと独自のアレイ信号処理を併用することで、送信時には副次的に発生する不要なビームが抑制可能であり、受信時には到来波が縦波であるか横波であるかを判別可能であることが示されている。これは、アレイ超音波探傷法におけるある種のアーティファクトが判別・抑制できることを示すものである。提案された3自由度プローブとアレイ信号処理による可視化手法は、従来不可避であった可視化像におけるアーティファクトを部分的ではあるものの軽減できるものであり、本論文の成果をより発展させることにより特に弾性体中の非破壊検査への寄与が期待されるものであり、高く評価できる。

【最終試験の結果】

平成29年2月7日、システム情報工学研究科において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。